

# Modelado y Simulación Realista del Módulo Posterior de un Radiómetro: Aplicación al Instrumento a 31 GHz del Experimento QUIJOTE

F. J. Casas<sup>(1)</sup>, J. Portilla<sup>(2)</sup>, J. P. Pascual<sup>(3)</sup>, M. L. de la Fuente<sup>(3)</sup>, B. Aja<sup>(3)</sup>, E. Artal<sup>(3)</sup>, E. Martinez-Gonzalez<sup>(1)</sup>

casas@ifca.unican.es, joaquin.portilla@ehu.es, pascualp@unican.es

<sup>(1)</sup> Instituto de Física de Cantabria, CSIC-Universidad de Cantabria, Avenida los Castros s/n, 39005, Santander, Spain.

<sup>(2)</sup> Dpto. de Electricidad y Electrónica. Universidad del País Vasco. Apartado 644, 48080 Bilbao, Spain.

<sup>(3)</sup> Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Avenida los Castros s/n, 39005, Santander, Spain.

**Abstract-** In the reported work, an efficient modelling method is applied to the circuits of the 30 GHz Back End Module of the QUIJOTE experiment radiometer. In particular, efficient models of two LNAs, a band pass filter and a detector has been obtained. These models allow realistic time-domain BEM simulation by using Gaussian noise excitation signals. Simulation results have been reported, showing good agreement with the BEM expected operation. On the other hand, time-domain realistic simulations will provide valuable information about BEM behaviour previously to the receiver definitive implementation.

## I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta el modelado y simulación a nivel de sistema del BEM del radiómetro que se está diseñando y fabricando en la actualidad para el experimento QUIJOTE CMB. QUIJOTE es una colaboración del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), Instituto de Física de Cantabria (IFCA), Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria (DICOM), Jodrell Bank Observatory de Manchester (JBO) y el Cavendish Laboratory de Cambridge. El experimento consiste en 3 antenas similares que serán instaladas en el observatorio del Teide y medirán la polarización del fondo cósmico de microondas (CMB) corrigiendo y complementando las medidas obtenidas por el satélite PLANCK [1-2]. La primera antena tendrá en su plano focal cinco receptores: dos a 10-14 GHz, dos más a 14-20 GHz y otro a 26-36 GHz. Los prototipos del BEM para las citadas bandas de operación han sido diseñados, fabricados y caracterizados por el DICOM y precisamente el prototipo que opera a 31 GHz, con una banda de 10 GHz, es el objeto de este artículo.

Debido a la complejidad y el coste del modelado y simulación de los receptores radiométricos, en la práctica, esta tarea suele ser simplificada al máximo, utilizando modelos ideales y pruebas sencillas cuyos resultados son, en general, poco concluyentes. Sin embargo, la simulación de este tipo de receptores podría evitar muchos ciclos de diseño y fabricación, siempre y cuando se disponga de modelos precisos y reducidos que posibiliten simulaciones realistas y

con un coste computacional razonable, tanto en consumo de recursos como en tiempo de simulación. En este sentido, se propone el uso de técnicas de reducción del orden de modelos presentadas en trabajos previos [3-4], en los que se utilizaban para el modelado y simulación de los subsistemas de transmisores y receptores para comunicaciones móviles. Dichas técnicas resultan especialmente eficaces en el ámbito de los receptores radiométricos ya que los modelos resultantes posibilitan la simulación en el dominio del tiempo. Esto es imprescindible cuando la señal de entrada que llega al receptor es ruido blanco, de espectro continuo y por tanto poco adecuada, a priori, para técnicas de simulación en el dominio de la frecuencia tales como el Balance Armónico.

Por otro lado, los modelos obtenidos pueden ser complementados y mejorados mediante la aplicación de técnicas para la incorporación de efectos degradantes del funcionamiento de un radiómetro, tales como la modulación de ganancia o el ruido 1/f [5], para obtener las figuras de mérito del receptor en condiciones realistas y determinar si el comportamiento del BEM es adecuado y cumple las especificaciones que se pretenden en QUIJOTE.

El resto del artículo se organiza como sigue: En la sección II se presenta la estructura del BEM y se trata el modelado de los diversos subsistemas que lo conforman. En la sección III se presentan los resultados de la simulación del mismo y finalizamos en la sección IV con las conclusiones.

## II. MODELADO DEL BEM

El esquema simplificado del BEM puede verse en la Figura 1. Teniendo en cuenta el carácter de prototipo, el diseño final podría variar algo, aunque básicamente la estructura seguirá siendo la misma. El BEM opera en una banda que va de 26 a 36 GHz. A la entrada se conectan en cascada dos LNAs (Low Noise Amplifier) comerciales y de tecnología monolítica debido a requerimientos de ganancia.

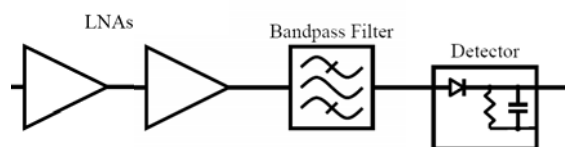


Fig. 1. Estructura simplificada del BEM a 31 GHz para QUIJOTE.

En concreto, el primero es el AMMC-6241 de Avago Technologies y el segundo es el ALH-140 de NGST.

Por otro lado, el filtro y el detector a diodo han sido diseñados y fabricados en tecnología híbrida en el DICOM.

#### A. Modelado del AMMC-6241

Para los dos LNAs se ha utilizado un modelo tipo Wiener [6] consistente en un circuito eléctrico lineal equivalente, que caracteriza la dinámica en pequeña señal del amplificador en toda la banda de operación, conectado a una no-linealidad sin memoria que implementa la característica Pin-Pout del amplificador, definida mediante un elemento de librería específico del simulador ADS de Agilent Technologies que es el utilizado en este trabajo. El modelo pequeña señal de esta no linealidad debe cumplir que esté perfectamente adaptado ( $S_{ii}=0$ ) y que la transmisión sea perfecta y bilateral ( $S_{ij}=1$ ) independientemente de la frecuencia. De esta forma las condiciones de adaptación vendrán determinadas por el filtro que caracteriza la dinámica lineal y que, a su vez, queda matizada por la característica no lineal Pin-Pout. Este tipo de modelos, al contrario de los basados en los datos puros de los parámetros [S] obtenidos mediante la medida de los circuitos, no dan problemas de convergencia y permiten la simulación en el dominio del tiempo de forma precisa.

El filtro lineal se obtiene mediante la aplicación de la técnica de modelado para sistemas lineales presentada en [3] de modo que se obtiene un filtro cuya respuesta frecuencial es la que se obtiene mediante la medida de los parámetros [S] del LNA. En la Figura 2 se comparan los parámetros [S] medidos con un analizador de redes (en rojo) y los del modelo (en azul). Se observan ciertas discrepancias, pero teniendo en cuenta el gran ancho de banda a caracterizar y que lo que se intenta ajustar son medidas del circuito, se consideró que la aproximación era suficientemente buena.

En cuanto a la característica Pin-Pout, se aproximó una que tuviese el punto de 1 dB de compresión dado por el fabricante ( $P_{in}=-12\text{dBm}$ ,  $P_{out}=10\text{dBm}$ ).

#### B. Modelado del ALH-140.

Para modelar este LNA se utiliza el mismo método descrito anteriormente. En la Figura 3 se aprecia la comparación de los parámetros [S] medidos del circuito y los del modelo. Frente al primer LNA, se observa que en este caso la respuesta del modelo se ajusta mejor a las medidas. Esto puede deberse a que dichas medidas presentan menos "ruido", por lo que el algoritmo de identificación de sistemas [3] funciona mejor. En cuanto a la característica no lineal Pin-Pout, de nuevo se ha implementado a partir del punto de 1 dB de compresión proporcionado por el fabricante ( $P_{in}=2\text{dBm}$ ,  $P_{out}=15\text{dBm}$ ).

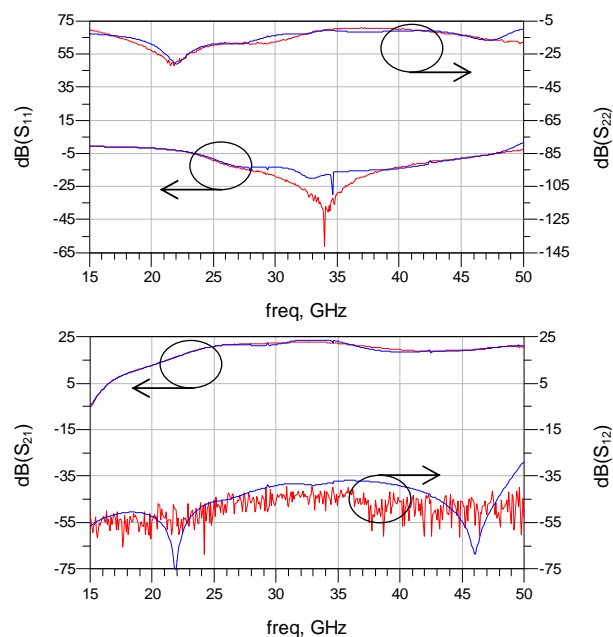


Fig. 2. Comparación de parámetros [S] del primer LNA. Medida: trazos rojos. Modelo: trazos azules.

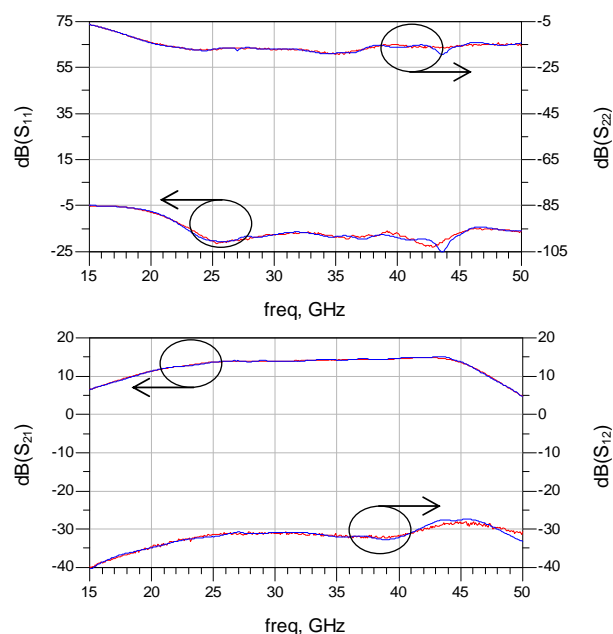


Fig. 3. Comparación de parámetros [S] del segundo LNA. Medida: trazos rojos. Modelo: trazos azules.

Cabe señalar en este punto que estas características podrían haber sido obtenidas mediante medida, para obtener un modelo más realista, pero en este caso se ha hecho así para comprobar de forma rápida si los LNAs tenían peligro de saturarse en operación nominal. Tras las pertinentes simulaciones en el dominio del tiempo y con señales de entrada realistas, se comprobó que el AMMC-6241 trabaja a más de 35 dB de back-off de entrada y el ALH-140 a más de 28. Quedando claro que la operación nominal de ambos LNAs se produce en régimen lineal, si no hubiese cambios en las condiciones de operación, no resultaría imprescindible un modelado no lineal más preciso de los amplificadores.

### C. Modelado conjunto de los LNAs y el Filtro

Dado que los dos LNAs de la entrada trabajan en régimen lineal, podemos aplicar la técnica de modelado para sistemas lineales [3], al conjunto de los dos LNAs y el filtro, de modo que con un solo modelo, se caracteriza la dinámica de los tres subsistemas, reduciendo en gran medida la complejidad del modelo y el coste computacional de las simulaciones.

La Figura 4 presenta la comparación de los parámetros [S] medidos del conjunto de los dos amplificadores y el filtro (trazo rojo), y los del modelo compacto obtenido (trazo azul). Se observa una buena concordancia entre las curvas, de modo que se puede deducir que el modelo caracteriza de forma apropiada la dinámica del conjunto.

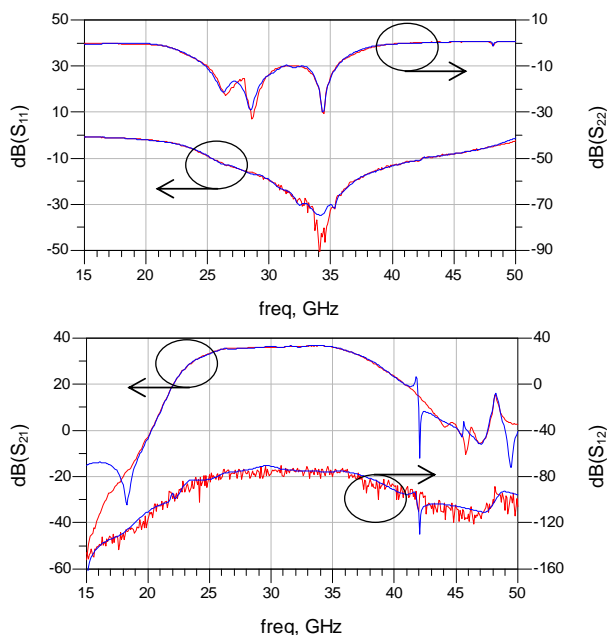


Fig. 4. Comparación de parámetros [S] del modelo de los dos LNAs y el filtro. Medida: trazos rojos. Modelo compacto: trazos azules.

### D. Detector

La estructura del modelo del detector es similar a la de los amplificadores, debido a que se caracteriza, por un lado, la adaptación de entrada pequeña señal y en RF ( $Y_{11}$  o  $S_{11}$ ), en la forma de una admitancia de entrada dependiente de la frecuencia, conectada en paralelo con un modelo eléctrico sencillo del detector, que implementa la característica no lineal a un tono a 31 GHz,  $P_{in}(RF)$ - $V_{out}(DC)$ . Debemos tener en cuenta, que esta estructura funciona en este caso debido a que la transmisión del detector en la banda de RF es nula y es por eso que en esta banda la adaptación de entrada queda determinada únicamente por el parámetro  $Y_{11}$  de la matriz de admitancias del detector.

En la Figura 5 se muestra la comparación del  $S_{11}$  del detector medido en la banda de RF (trazo rojo) junto con el del modelo (trazo azul). Las respuestas presentan un alto grado de coincidencia, por lo que podemos concluir que el modelo caracteriza de forma adecuada las condiciones de adaptación del conjunto LNAs y filtro con el detector.

Por otro lado, la característica no lineal RF-DC del modelo del detector, a un tono a 31 GHz, se puede hacer coincidir con la obtenida en medida del circuito, mediante el ajuste del valor de los parámetros del citado modelo eléctrico

sencillo. La Figura 6 muestra la superposición de la curva del modelo y la de un ajuste de las medidas del circuito.

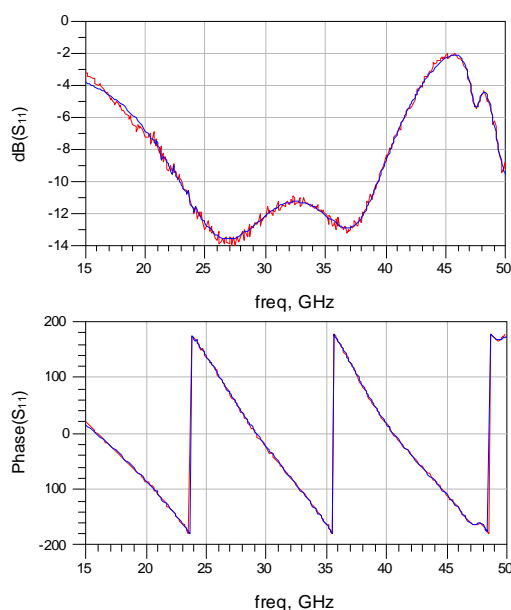


Fig. 5. Comparación de la adaptación de entrada del detector en forma de su parámetro  $S_{11}$ . Medida: trazo rojo. Modelo: trazos azules.

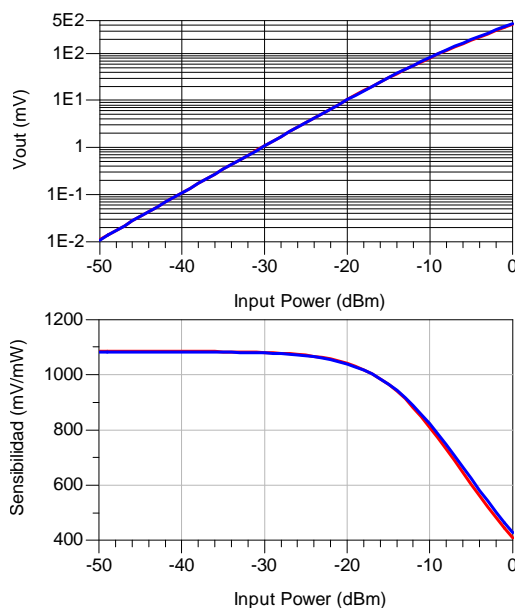


Fig. 6. Características no lineales del detector  $V_{DC}$  y Sensibilidad vs.  $P_{in}$ . El trazo rojo corresponde a un ajuste de medidas del circuito y el azul al ajuste del modelo.

## III. SIMULACIÓN DEL BEM

En esta sección se muestran los resultados de la simulación temporal del BEM en condiciones realistas. Para ello se introduce como excitación una señal de ruido blanco con una potencia nominal de -53 dBm aproximadamente y filtrada, para emular el efecto que tendría en la señal proveniente del cielo su paso a través del FEM (Front End Module) del radiómetro. La Figura 7 muestra, como resultado de la simulación, la señal de entrada al BEM. En la

parte superior se muestra la señal en el dominio del tiempo y en la inferior su representación en el de la frecuencia.

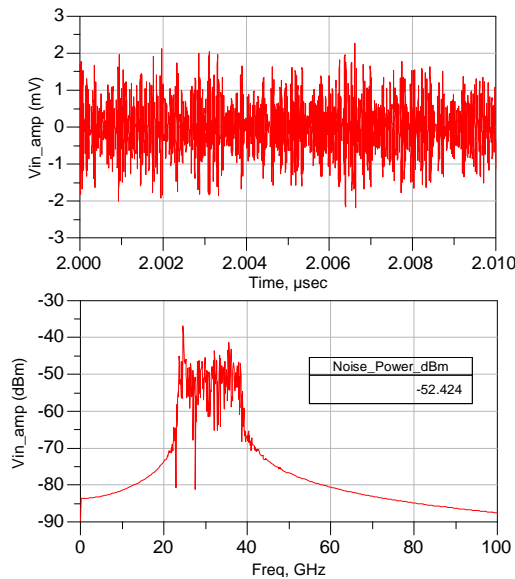


Fig. 7. Señal de entrada al BEM en condiciones nominales. Superior: señal en el dominio del tiempo. Inferior: Señal en el dominio de la frecuencia.

A continuación, en la Figura 8, se muestra la señal de salida del filtro, que es la de entrada al detector. Se ve el efecto de la amplificación de la señal e incluso la generación de espurios que en este caso no estarían debidos a los LNAs ya que el modelo utilizado es lineal, sino más bien, a la no linealidad del detector (ver espectro en cuadro inferior).

Por último, la Figura 9 presenta la señal de salida del detector. Se observa como el detector produce únicamente una señal DC-baja frecuencia a su salida, ya que la componente RF queda filtrada casi por completo (ver espectro).

#### IV. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el modelado reducido y simulación en el dominio del tiempo del prototipo del BEM de un radiómetro que se está fabricando para llevar a cabo la misión científica QUIJOTE para estudio del CMB. Las técnicas de modelado utilizadas dan lugar a modelos compactos que posibilitan la simulación realista en el dominio del tiempo con señales de entrada del tipo ruido blanco. Así mismo, se han mostrado los resultados de la simulación del modelo del BEM. El siguiente paso, será la obtención de figuras de mérito que nos darán información útil y fiable sobre el comportamiento del receptor y si se ajusta a lo requerido para el éxito de la misión QUIJOTE.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del MEC ref. AYA2007-68058-C03-02 y por el proyecto del CSIC ref. 200450E405.

#### REFERENCIAS

[1] M. Bersanelli, B. Aja, et al. "PLANCK-LFI: Instrument Design and Ground Calibration Strategy" Proceedings of the European Microwave Association (EuMA) VOL. 1; September 2005.

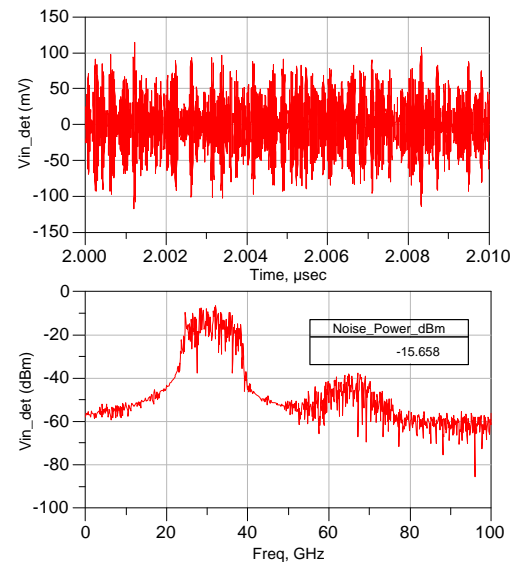


Fig. 8. Señal de entrada al detector en condiciones nominales. Superior: señal en el dominio del tiempo. Inferior: Señal en el dominio de la frecuencia.

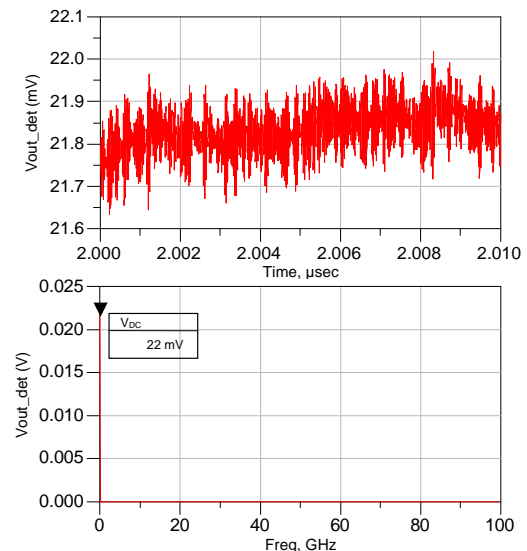


Fig. 9. Señal de salida del detector en condiciones nominales. Superior: señal en el dominio del tiempo. Inferior: Señal en el dominio de la frecuencia.

- [2] J.P. Pascual, B. Aja, M.L. De la Fuente, E. Artal, "Radiometer Simulation using RF Platforms", *Proceedings 2004 International Workshop on Electronics and System Analysis*, pp. 119-122, U.P.V/E.H.U. Fac. de Ciencia y Tecnología, Bilbao (España), Oct. 2004.
- [3] F. J. Casas, J. Portilla, R. Quéré, A. Mallet, J. F. Villemazet, "Model-Order Reduction of Linear and Weakly Nonlinear Time-Varying RF and Microwave Circuits", *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*. Vol. 52, No. 9, September 2004, pp. 2262-2274.
- [4] F. J. Casas, J. Portilla, "Técnicas de Reducción del Orden de Modelos Aplicadas a la Simulación de Cabeza de Recepción de Señales", *URSI 2004 XIX Simp. Nacional, Actas del Simposio*, Universitat Ramon Llull (Barcelona), Septiembre 2004.
- [5] J.P. Pascual, B. Aja, M.L. de la Fuente, T. Pomposo, E. Artal, "System Simulation of a differential Radiometer Using Standard RF-Microwave Simulators", *Simulation, Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, Vol. 81, Issue 11, pp.735-755, Nov. 2005.
- [6] K. M. C. Jeruchim, P. Balaban, K. S. Shanmugan, *Simulation of Communication Systems*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000.